



UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA

**OPTIMALISASI PARAMETER NEUTRONIK DARI SISI
VARIASI REFLEKTOR DAN *BURNABLE POISON* PADA
MICRO MOLTEN SALT REACTOR SEBAGAI POTENSI
SUMBER ENERGI BERSIH DAN BERKELANJUTAN DI
WILAYAH 3T INDONESIA**

MUTHIAH ALFIYAH YAMIN

320210304018

**Skripsi yang Ditulis Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Sarjana**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM MILITER
PROGRAM STUDI FISIKA**

BOGOR, 2025

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Nama : Muthi'ah Alfiyah Yamin
NIM : 320210304018
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul Skripsi : Optimalisasi Parameter Neutronik dari Sisi Variasi Reflektor dan *Burnable Poison* pada *Micro Molten Salt Reactor* sebagai Potensi Sumber Energi Bersih dan Berkelanjutan di Wilayah 3T Indonesia

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,



Dr. Mutia Meireni, S.S.T., M.Sc., M.Si
NIP. 198905242022032003
Tanggal ..9 Juli..... 2025



Dr. Azizul Khakim S.T. M. Eng
NIP. 197112241999121001
Tanggal 17 Juli..... 2025

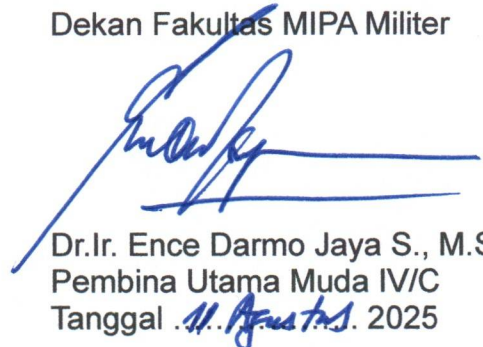
Mengetahui,

Kepala Program Studi Fisika,

Dekan Fakultas MIPA Militer



M. Zuhnir P., S.Si., M.Eng.
Kolonel Tek. NRP. 522657
Tanggal 2025



Dr. Ir. Ence Darmo Jaya S., M.Si.
Pembina Utama Muda IV/C
Tanggal ..11 Agustus.. 2025

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Nama : Muthi'ah Alfiyah Yamin
NIM : 320210304018
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul Skripsi : Optimalisasi Parameter Neutronik dari Sisi Variasi Reflektor dan *Burnable Poison* pada *Micro Molten Salt Reactor* sebagai Potensi Sumber Energi Bersih dan Berkelanjutan di Wilayah 3T Indonesia

No	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1	Dosen Pembimbing 1: Dr. Mutia Meireni, S.S.T., M.Sc., M.Si NIP. 198905242022032003		9/7/2025
2	Dosen Pembimbing 2: Dr. Azizul Khakim S.T. M. Eng NIP. 197112241999121001		12/7/2025
3	Dosen Penguji 1: Khazali Fahmi, S.Pd., M.Si. NIP. 199208142022031002		9/7/2025
4	Dosen Penguji 2: Diyana Parwatiningtyas, S.Si., M.T., M.Sc. NIP. 197801222024212001		9/7/2025

PERNYATAAN ORSINILITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau bagian karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan jenjang apapun di suatu Perguruan Tinggi; dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat istilah, frasa, kalimat, paragraf, subbab atau bab dari karya yang pernah ditulis atau diterbitkan; kecuali yang secara tertulis diajukan dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa terdapat plagiat dalam skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan/undang undang yang berlaku.

Bogor, 11 Juli 2025



Muthi'ah Alfiyah Yamin

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Pertahanan Republik Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muthi'ah Alfiyah Yamin

NIM : 320210304018

Program Studi : Sarjana Fisika

Fakultas : MIPA Militer

Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Optimalisasi Parameter Neutronik dari Sisi Variasi Reflektor dan *Burnable Poison* pada *Micro Molten Salt Reactor* sebagai Potensi Sumber Energi Bersih dan Berkelanjutan di Wilayah 3T Indonesia

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pertahanan Republik Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Bogor

Pada tanggal: 11 Agustus 2025

Yang menyatakan



Muthi'ah Alfiyah Yamin
NIM. 320210304018

KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulisan skripsi dengan judul: "Optimalisasi Parameter Neutronik dari Sisi Variasi Reflektor dan *Burnable Poison* pada *Micro Molten Salt Reactor* sebagai Potensi Sumber Energi Bersih dan Berkelanjutan di Wilayah 3T Indonesia" dapat diselesaikan.

Penyusunan skripsi ini ditujukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer Universitas Pertahanan RI. Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini Kadet Mahasiswa mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kolonel Teknik M.Zuhnir Piliang, S.Si., M.Eng. Kepala Program Studi Fisika Universitas Pertahanan Republik Indonesia.
2. Dr. Mutia Meireni, S.S.T., M.Sc., M.Si, sebagai Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan arahan, masukan, semangat, dan bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini selesai.
3. Dr. Azizul Khakim S.T. M. Eng, sebagai Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini selesai
4. Wahid Luthfi, S.T.M.Si , selaku mentor penelitian yang selalu memberikan ilmu, wawasan, dan bimbingan dalam menyelesaikan penelitian ini.
5. Bapak Muhammad Asdar Yamin dan Ibu Nur Ismi Busthanul, selaku orang tua peneliti, atas segala doa, kasih sayang, serta dukungan yang tidak pernah putus sepanjang proses studi hingga selesainya skripsi ini.
6. Moh. Hisni Alfian Baarik, selaku rekan dan *support system* yang

senantiasa memberikan semangat, motivasi, dan menemani peneliti selama penyusunan skripsi.

7. Rekan-rekan kelompok belajar, yang selalu memberikan semangat, kebersamaan, serta dukungan selama proses penyusunan skripsi ini berlangsung.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan- kebaikan berbagai pihak atas bantuannya.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih kurang sempurna, oleh karena itu dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi kesempurnaan skripsi ini.

Akhirnya, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan ilmu pertahanan dan bermanfaat bagi stakeholder terkait dalam upaya merancang merealisasikan pembangun PLTN di Indonesia.

Bogor, Juli 2025

Muthi'ah Alfiyah Yamin

ABSTRAK

OPTIMALISASI PARAMETER NEUTRONIK DARI SISI VARIASI REFLEKTOR DAN *BURNABLE POISON* PADA *MICRO MOLTEN SALT REACTOR* SEBAGAI POTENSI SUMBER ENERGI BERSIH DAN BERKELANJUTAN DI WILAYAH 3T INDONESIA

Wilayah Terdepan, Terluar, dan Tertinggal (3T) di Indonesia menghadapi tantangan besar dalam penyediaan energi akibat keterbatasan infrastruktur dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. *Micro Molten Salt Reactor* menawarkan solusi potensial melalui desain reaktor skala kecil berbasis garam cair yang efisien dan aman. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter neutronik MSR dengan memvariasikan material dan ketebalan reflektor untuk meningkatkan k_{eff} , serta material dan konsentrasi *burnable poison*, guna mencapai nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) mendekati 1,01 dan memastikan keselamatan reaktor. Simulasi dilakukan menggunakan metode Monte Carlo berbasis perangkat lunak OpenMC untuk mengevaluasi parameter kunci seperti k_{eff} , *Temperature Coefficient of Reactivity*, *Void Coefficient of Reactivity*, serta reaktivitas *burnable poison* dan batang kendali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reflektor grafit dengan ketebalan 140 cm menghasilkan k_{eff} sebesar 1,1784, nilai tertinggi dibandingkan material reflektor lainnya. Erbium pada konsentrasi 0,12% efektif menurunkan reaktivitas awal, menjaga kestabilan reaktivitas sepanjang siklus, dengan rasio perubahan reaktivitas sebesar -0,0172 (% $\Delta k/k$)/ppm pada BOC dan tetap negatif sebesar -0,0029 (% $\Delta k/k$)/ppm pada MOC. Evaluasi konfigurasi batang kendali menunjukkan bahwa empat batang kendali memberikan margin pengendalian reaktivitas yang cukup, dengan penurunan reaktivitas sebesar 7,6913 % $\Delta k/k$ pada BOC dan 7,1992 % $\Delta k/k$ pada MOC. Evaluasi terhadap koefisien reaktivitas menunjukkan bahwa TCR bernilai negatif, mendukung kemampuan *self-regulating* reaktor, sementara VCR yang positif tetap dalam batas aman untuk operasi. Temuan ini mengonfirmasi bahwa optimalisasi konfigurasi reflektor dan *burnable poison* dapat meningkatkan performa neutronik dan keselamatan operasional Micro MSR, menjadikannya kandidat kuat sebagai sumber energi bersih dan berkelanjutan untuk wilayah 3T Indonesia.

Kata Kunci: *Micro Molten Salt Reactor*, Parameter Neutronik, *Burnable Poison*
Reflektor, OpenMC, Wilayah 3T

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF NEUTRONIC PARAMETERS THROUGH REFLECTOR AND BURNABLE POISON VARIATIONS IN A MICRO MOLTEN SALT REACTOR AS A POTENTIAL SOURCE OF CLEAN AND SUSTAINABLE ENERGY IN INDONESIA'S 3T REGIONS

Indonesia's Frontier, Outermost, and Underdeveloped (3T) regions face major challenges in energy provision due to limited infrastructure and heavy reliance on fossil fuels. The Micro Molten Salt Reactor presents a promising solution through its small-scale, efficient, and inherently safe molten salt-based design. This study aims to optimize the neutronic parameters of the MSR by varying the material and thickness of reflectors to enhance the k_{eff} and by adjusting the material and concentration of burnable poisons, targeting an effective multiplication factor (k_{eff}) of approximately 1,01 while ensuring reactor safety. Simulations were performed using the Monte Carlo method via OpenMC software to evaluate key parameters such as k_{eff} , Temperature Coefficient of Reactivity, Void Coefficient of Reactivity, and the reactivity behavior of burnable poisons and control rods. Results show that a graphite reflector with 140 cm thickness yields the highest k_{eff} of 1,1784. Among BPs, Erbium at 0,12% concentration effectively reduces initial reactivity and maintains stability throughout the cycle, with a reactivity change ratio of $-0,0172$ ($\% \Delta k/k$)/ppm at BOC and $-0,0029$ ($\% \Delta k/k$)/ppm at MOC. Control rod evaluation shows that four rods provide sufficient reactivity suppression, achieving reductions of 7,6913 $\% \Delta k/k$ at BOC and 7,1992 $\% \Delta k/k$ at MOC. TCR values were negative across all cases, indicating strong self-regulating behavior, while positive VCR values remained within acceptable limits. These findings confirm that optimizing the reflector and burnable poison configurations can significantly enhance the neutronic performance and operational safety of the Micro MSR, positioning it as a strong candidate for providing clean and sustainable energy to Indonesia's 3T regions.

Keywords: *Micro Molten Salt Reactor, Neutronic Parameters, Burnable Poison, Reflector, OpenMC, 3T Regions*

DAFTAR ISI

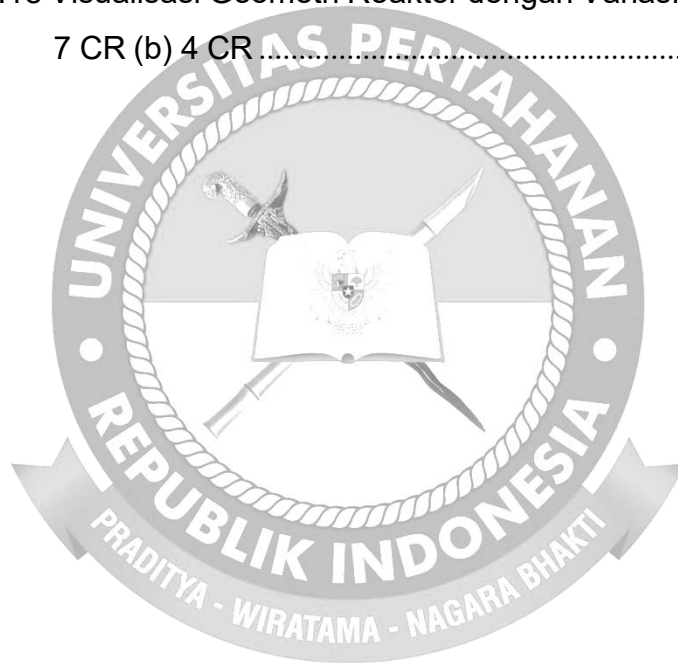
SAMPUL DEPAN.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	iii
PERNYATAAN ORSINILITAS.....	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.4.1 Manfaat Teoritis.....	4
1.4.2 Manfaat Praktis.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Landasan Teori.....	5
2.1.1 Energi Nuklir.....	5
2.1.2 Reaktor Nuklir.....	9
2.1.3 <i>Micro Molten Salt Reactor</i>	15
2.1.4 Faktor Multipikasi Efektif (K_{eff}).....	16
2.1.5 Reaktivitas Reaktor Nuklir dan Koefisien Reaktivitas.....	17
2.1.6 Fraksi Bakar (<i>Burnup</i>).....	21
2.1.7 <i>Burnable Poison</i>	21
2.1.8 OpenMc.....	22
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu.....	24

2.3	Kerangka Berpikir.....	29
2.4	Hipotesis	30
BAB III METODE PENELITIAN		31
3.1	Metode dan Desain Penelitian	31
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	32
3.3	Perangkat Lunak yang Digunakan	34
3.4	Variabel Penelitian	34
3.5	Prosedur Penelitian.....	35
3.6	Metode Analisis	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		38
4.1	Optimasi Material dan Ketebalan Reflektor Terhadap Parameter Neutronik	38
4.2	Variasi Material dan Konsentrasi <i>Burnable Poison</i>	43
4.3	Analisis <i>Burnup</i>	45
4.4	Analisis Reaktivitas <i>Burnable Poison</i>	52
4.5	Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali.....	54
4.6	<i>Temperature Coefficient Reactivity</i>	55
4.7	<i>Void Coefficient Reactivity</i>	63
4.8	Parameter Neutronik Teras Reaktor dengan Penambahan BP Erbium	65
4.9	Evaluasi Kriteria Keselamatan Neutronik untuk Penerapan <i>Micro MSR</i> di Wilayah 3T... ..	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA		72
LAMPIRAN		77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Reaksi Fisi Inti U^{235}	5
Gambar 2.2	Tampang Lintang Fisi U^{235} dan U^{238}	8
Gambar 2.3	Tampang Lintang Capture Th^{232}	9
Gambar 2.4	Evolusi Reaktor Nuklir	9
Gambar 2.5	Komponen Umum Reaktor Nuklir	10
Gambar 2.6	Moderasi Neutron Cepat oleh Material Moderator	11
Gambar 2.7	Efek <i>Over</i> dan <i>Under</i> Moderated pada Nilai K_{eff}	20
Gambar 2.8	Kerangka Berpikir	29
Gambar 3.1	Prosedur Penelitian	35
Gambar 4.1	Visualisasi Geometri Reaktor dengan Variasi Ketebalan Reflektor: (a) Radius Reflektor 100 cm (b) Radius Reflektor 140 cm	39
Gambar 4.2	Nilai K_{eff} terhadap Ketebalan Reflektor untuk Berbagai Jenis Material Reflektor	39
Gambar 4.3	Tampang Lintang Reaksi Penyerapan Neutron Isotop Gd^{157} , Er^{167} , dan Ir^{191}	44
Gambar 4.4	Nilai K_{eff} terhadap Fungsi <i>Burnup</i>	46
Gambar 4.5	Evolusi Massa Isotop Gd^{155} dan Gd^{157} terhadap EFPD	47
Gambar 4.6	Evolusi Massa Isotop Ir^{191} dan Ir^{193} terhadap EFPD	48
Gambar 4.7	Evolusi Massa Isotop Er^{167}	49
Gambar 4.8	Evaluasi Massa U^{235} Selama Proses <i>Burnup</i>	50
Gambar 4.9	Evaluasi Massa U^{238} Selama Proses <i>Burnup</i>	50
Gambar 4.10	Evaluasi Massa Th^{232} Selama Proses <i>Burnup</i>	51
Gambar 4.11	Evaluasi Massa U^{233} Selama Proses <i>Burnup</i>	51
Gambar 4.12	Evaluasi Massa Pu^{239} Selama Proses <i>Burnup</i>	51
Gambar 4.13	Evaluasi Massa Pu^{241} Selama Proses <i>Burnup</i>	52
Gambar 4.14	<i>Fuel Temperature Coefficient</i> pada Kondisi (a) BOC, (b) MOC, dan (c) EOC	56

Gambar 4.15 <i>Moderator Temperature Coefficient</i> pada Kondisi (a) BOC, (b) MOC, dan (c) EOC	59
Gambar 4.16 Spektrum Fluks Neutron pada Suhu Moderator 500 K, 900 K, 1300 K, dan 1500 K.....	60
Gambar 4.17 Void Coefficient Reactivity pada Kondisi (a) BOC, (b) MOC, dan (c) EOC	64
Gambar 4.18 Visualisasi Geometri Reaktor dengan Variasi Control Rod: (a) 7 CR (b) 4 CR	66



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	24
Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian	33
Tabel 3.2 Variabel Penelitian.....	34
Tabel 3.3 Parameter Desain <i>Micro</i> MSR	36
Tabel 4.1 Pengaruh Material dan Ketebalan Reflektor terhadap k_{eff} dan $\frac{\Delta k_{eff}}{\Delta r}$	42
Tabel 4.2 Variasi Material dan Konsentrasi <i>Burnable Poison</i> terhadap Nilai k_{eff}	43
Tabel 4.3 Reaktivitas <i>Burnable Poison</i> pada Kondisi BOC dan MOC.....	53
Tabel 4.4 Nilai Reaktivitas Batang Kendali	54
Tabel 4.5 Nilai FTC, MTC, dan TCR pada Berbagai Material <i>Burnable Poison</i> di Berbagai Tahap Siklus Operasi Reaktor	62
Tabel 4.6 VCR untuk Konfigurasi Standar dan <i>Burnable Poison</i>	64
Tabel 4.7 Reaktivitas Batang Kendali untuk Konfigurasi 7 dan 4 CR dengan <i>Burnable Poison</i> Erbium	66
Tabel 4.8 Evaluasi Parameter Keselamatan Neutronik untuk Konfigurasi Erbium	67